

5 EP 2 836 4



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 **Offenlegungsschrift**  
10 **DE 101 46 376 A 1**

51 Int. Cl. 7:  
**H 02 P 7/36**  
G 05 B 17/02

21 Aktenzeichen: 101 46 376.6  
22 Anmeldetag: 20. 9. 2001  
43 Offenlegungstag: 2. 5. 2002

DE 101 46 376 A 1

30 Unionspriorität:  
669211 25. 09. 2000 US  
71 Anmelder:  
Ford Global Technologies, Inc., Dearborn, Mich.,  
US  
74 Vertreter:  
Rechts- und Patentanwälte Lorenz Seidler Gossel,  
80538 München

72 Erfinder:  
Sepe, Raymond B., Cranston, R.I., US; Miller, John  
Michael, Saline, Mich., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers

51 Es wird ein Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers eines umlaufenden Induktionsmaschinensystems zur Hand gegeben. Der Fuzzy-Logic-Regler weist mindestens einen Eingang und mindestens einen Ausgang auf. Jeder Eingang nimmt einen Maschinensystem-Betriebsparameter an. Jeder Ausgang erzeugt mindestens einen Maschinensystem-Regelparameter. Der Fuzzy-Logic-Regler erzeugt jede Ausgangsgröße anhand von mindestens einer Eingangsgröße und von Fuzzy-Logic-Entscheidungsparametern. Die Optimierung beginnt durch Erhalten einer Datenmenge, welche jeden Regelparameter mit mindestens einem Betriebsparameter für jeden Maschinenbetriebsbereich verknüpft. Es wird ein Modell für jeden Maschinenbetriebsbereich anhand der erhaltenen Maschinenbetriebsbereichsdaten konstruiert. Der Fuzzy-Logic-Regler wird mit mindestens einem erzeugten Modell in einer Rückführungsschleife von einem Fuzzy-Logic-Ausgang zu einem Fuzzy-Logic-Eingang simuliert. Die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter werden anhand der Simulation optimiert.

DE 101 46 376 A 1

# DE 101 46 376 A 1

## Beschreibung

[0001] Querverweis auf eine verwandte Anmeldung

[0002] Diese Anmeldung beansprucht den Nutzen der vorläufigen US-Anmeldung Seriennr. 60/156.884, eingereicht am 30. September 1999, mit dem Titel "Fuzzy Logic Controller Optimization", deren Beschreibung in ihrer Gesamtheit durch Erwähnung ausdrücklich Bestandteil dieser Anmeldung wird.

[0003] Diese Erfindung erfolgte mit Unterstützung der Regierung unter der NREL Subcontract Nr. ZCB-4-13032, Prime Contract Nr. DE-AC36-83CH10093, erteilt durch das Department of Energy. Die Regierung hat gewisse Rechte an der Erfindung.

## Gebiet der Erfindung

[0004] Die vorliegende Erfindung betrifft die Optimierung von Reglern mit unscharfer Logik, sogenannter Fuzzy Logic, welche bei umlaufenden Induktionsmaschinensystemen verwendet werden.

## Hintergrund der Erfindung

[0005] Ein umlaufendes Induktionsmaschinensystem überträgt durch elektromagnetische Induktion Kraft zwischen einem feststehenden Element, dem Ständer, und einem umlaufenden Element, dem Läufer. Der Ständer enthält eine oder mehrere Folgen von Wicklungen, die in parallelen Schlitzen entlang der Ständerlänge angeordnet sind. Der Läufer ist so ausgelegt, dass er in dem Ständer dreht, wobei er typischerweise Elektromagneten trägt, die durch einen Erregungsstrom oder Flussregelungsstrom angetrieben werden. Eine Induktionsmaschine kann durch Zufuhr von Wechselstrom zu dem Ständer als Motor betrieben werden. Der Ständerstrom erzeugt umlaufende Magnetfelder in dem Ständer, was ein Drehen des Läufers bewirkt und abgegebene Leistung als Drehmoment bei einer gewissen Drehgeschwindigkeit erzeugt. Eine Induktionsmaschine kann durch Zufuhr von Drehkraft zu dem Läufer auch als Generator betrieben werden, wodurch ein Wechselstrom in den Ständerwicklungen induziert wird.

[0006] Neben der Maschine selbst sind weitere Bestandteile typischerweise erforderlich, um die Induktionsmaschine anzutreiben und zu regeln. Ein Wechselrichter oder eine Gleichrichter-Wechselrichter-Kombination wird zur Erzeugung von zyklischem Strom für die Motordrehzahlregelung verwendet. Ein Geschwindigkeitsregler gleicht den Schlupf zwischen dem umlaufenden Magnetfeld und dem Läufer aus. Ein Vektorstromregler ermittelt die Größenordnung und Zeiteinstellung der Stromregelimpulse.

[0007] Eine Regelung mit Fuzzy Logic wurde in Induktionsmaschinensystemen zur Schätzung von Regelparametern und zur Erzeugung von Regelsignalen aufgenommen. Ein Regler mit Fuzzy Logic weist jedes Eingangsmuster einem oder mehreren Mengen einer Mitgliedsgradfunktion zu. Dann werden Inferenzregeln zur Erzeugung von Ausgangswerten anhand der Mitgliedsgradmengen der Eingangsvariablen verwendet. Die Ausgangsgrößen werden dann "defuzzifiziert", um Regelausgangssignale zu erzeugen. Fuzzy-Entscheidungsparameter, beispielsweise Mitgliedsgradfunktionen, müssen optimiert bzw. abgestimmt werden, um die gewünschten Regeleigenschaften zu verwirklichen.

[0008] Eine beispielhafte Anwendung eines Reglers mit Fuzzy Logic ist in der Regelung eines Induktionsstarters/-alternators für ein elektrisches Hybridfahrzeug zu finden. Ein derartiges geregeltes Gerät ist der Starter/Alternator, der in einem Fachaufsatz von J. M. Miller et al. mit dem Titel "Starter-Alternator for Hybrid Electric Vehicle: Comparison of Induction and Variable Reluctance Machines and Drives", erschienen in IEEE IAS Conference Proceedings, Seiten 513-523, 1998, beschrieben wird und welcher durch Erwähnung hiermit Bestandteil dieser Anmeldung wird.

[0009] Der Induktionsstarter/-alternator kann sowohl durch einen Geschwindigkeitsregler zur Wahrung einer konstanten Drehgeschwindigkeit als auch durch einen Regler mit Fuzzy Logic zur Optimierung der Leistungseffizienz geregelt werden. Derartige Regelsysteme werden in einem Fachaufsatz von G. C. D. Sousa et al. mit dem Titel "Fuzzy Logic Based On-Line Efficiency Optimization Control of an Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive", erschienen in IEEE-IECON Conference Record, Seiten 1168-1174, 1993 und in dem US-Patent Nr. 5.652.485 mit dem Titel "Fuzzy Logic Integrated Electrical Control To Improve Variable Speed Wind Turbine Efficiency And Performance", erteilt am 29. Juli 1997 für Spiegel et al., beschrieben, welche beide hiermit durch Erwähnung Bestandteil dieser Anmeldung werden.

[0010] Erforderlich ist eine verbesserte Optimierung der Betriebsparameter des Fuzzy-Logic-Motorreglers. Das Optimierungsverfahren sollte sich mühelos an alle an dem geregelten System erfolgten Änderungen anpassen. Das Optimierungsverfahren sollte weiterhin eine automatische Abstimmung der Fuzzy-Logic-Regelparameter erlauben.

## Offenbarung der Erfindung

[0011] Die vorliegende Erfindung optimiert Parameter eines Fuzzy-Logic-Reglers durch Simulation, ohne dass komplexe und potentiell ungenaue Modelle des geregelten umlaufenden Induktionsmaschinensystems entwickelt werden müssen.

[0012] Im Allgemeinen weist der Fuzzy-Logic-Regler mindestens einen Eingang und mindestens einen Ausgang auf, wobei jeder Eingang einen Maschinensystembetriebsparameter annimmt und jeder Ausgang mindestens einen Maschinensystemregelparameter erzeugt. Der Fuzzy-Logic-Regler erzeugt jede Ausgangsgröße anhand von mindestens einer Eingangsgröße und von Fuzzy-Logik-Entscheidungsparametern. Das Ziel ist die Optimierung der Fuzzy-Logik-Entscheidungsparameter. Um die Optimierung einzuleiten, wird eine die Regelparameter mit den Betriebsparametern verknüpfende Datenmenge für jeden der einen oder mehreren Maschinenbetriebsbereiche gewonnen. Ein auf Messung beruhendes Modell wird für jeden Maschinenbetriebsbereich anhand der gewonnenen Daten konstruiert. Der Fuzzy-Logic-Regler wird mit mindestens einem erzeugten Modell in einer Rückführungsschleife von mindestens einem Fuzzy-Logic-Ausgang zu mindestens einem Fuzzy-Logic-Eingang simuliert. Die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter werden an-

hand der Simulationsergebnisse optimiert. Die Simulation mit einem auf Messung beruhenden Modell des Maschinensystems ist als Hardware-Daten-in-der-Simulationsschleife (HDSL) bekannt. Die Verwendung von HDSL eliminiert die Notwendigkeit der Entwicklung mathematischer Modelle, die das Maschinensystem verkörpern. Derartige mathematische Modelle sind häufig ungenaue Annäherungen an das tatsächliche System. Zudem erfordern alle Änderungen im Maschinensystem eine Neuformulierung des Modells.

[0013] Typischerweise umfassen Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter Fuzzy-Mitgliedsgradfunktionsbereiche. Diese Werte werden angepasst, um eine gewünschte dynamische Reaktion für das Maschinensystem auf eine Störeingabe oder auf eine Änderung des gewünschten Betriebsbereichs zu erhalten. Die Simulation einer Änderung des gewünschten Betriebsbereichs kann während der Simulation durch Schalten zwischen Modellen, die auf verschiedenen Maschinenbetriebsbereichen beruhen, verwirklicht werden. Der Eingang des Fuzzy-Logic-Reglers wird dann überwacht, um zu ermitteln, ob die Reaktion die gewünschten dynamischen Eigenschaften, wie Ausregelzeit, Überspringen, usw. aufweist. Wenn die Reaktion nicht die dynamischen Anforderungen erfüllt, können die Mitgliedsgradbereiche variiert werden.

[0014] Entscheidungsparameter können manuell geändert werden. Alternativ zur manuellen Änderung von Fuzzy-Logic-Entscheidungsparametern und dem erneuten Durchlaufen der Simulation können die Entscheidungsparameter mit Hilfe von adaptiver Neuro-Fuzzy-Inferenz, die durch ein adaptives Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem (ANFIS) erzeugt wird, automatisch abgestimmt werden.

[0015] Es wird ein Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein umlaufendes Induktionsmaschinensystem zur Hand gegeben. Der Fuzzy-Logic-Regler weist mindestens einen Eingang und mindestens einen Ausgang auf. Jeder Eingang nimmt einen Maschinensystembetriebsparameter an. Jeder Ausgang erzeugt mindestens einen Maschinensystemregelparameter. Der Fuzzy-Logic-Regler erzeugt jede Ausgangsgröße aufgrund von mindestens einer Eingangsgröße und von Fuzzy-Logic-Entscheidungsparametern. Die Optimierung beginnt durch Erhalt einer Datenmenge, welche jeden Regelparameter mit mindestens einem Betriebsparameter für jeden Maschinenbetriebsbereich verknüpft. Es wird ein auf den erhaltenen Maschinenbetriebsbereichdaten beruhendes Modell für jeden Maschinenbetriebsbereich konstruiert. Der Fuzzy-Logic-Regler wird mit mindestens einem erzeugten Modell in einer Rückführungsschleife von einem Fuzzy-Logic-Ausgang zu einem Fuzzy-Logic-Eingang simuliert. Die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter werden anhand der Simulation optimiert.

[0016] In den Ausführungen der vorliegenden Erfindung können die Betriebsparameter einen Messwert der Maschinensystem-Ausgangsleistung und des Maschinenflußstroms enthalten.

[0017] In einer weiteren Ausführung der vorliegenden Erfindung werden eine Vielzahl von Modellen erzeugt. Das Simulieren des Fuzzy-Logic-Reglers umfasst das Schalten zwischen Modellen, um eine Störeingabe in den Fuzzy-Logic-Regler zu erzeugen.

[0018] In einer noch weiteren Ausführung der vorliegenden Erfindung enthalten die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter Fuzzy-Mitgliedsgradfunktionen.

[0019] In noch weiteren Ausführungen der vorliegenden Erfindung werden die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter optimiert, um eine gewünschte dynamische Reaktion für das Maschinensystem zu verwirklichen oder um die Leistungseffizienz des Maschinensystems zu optimieren.

[0020] In einer weiteren Ausführung der vorliegenden Erfindung werden Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter mit Hilfe adaptiver Neuro-Fuzzy-Inferenz optimiert.

[0021] In einer noch weiteren Ausführung der vorliegenden Erfindung umfasst die Konstruktion jedes Modells den Aufbau einer Tabelle für jeden Maschinenbetriebsbereich, welche mindestens einen Maschinensystem-Betriebsbereich mit mindestens einem Maschinensystem-Regelparameter verknüpft.

[0022] Es wird auch ein Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein Starter-/Alternatorsystem zur Hand gegeben. Der Fuzzy-Logic-Regler hat einen Eingang für Systemleistung und einen Ausgang für die Flußstromregelung. Der Fuzzy-Logic-Regler erzeugt anhand des Leistungseingangs und anhand von Fuzzy-Logic-Entscheidungsparametern einen Stromregelausgang. Das Optimieren des Fuzzy-Logic-Reglers umfasst das Erhalten einer Datenmenge, welche die Systemleistung mit der Stromregelung für mindestens einen Maschinenbetriebsbereich verknüpft. Anhand der erhaltenen Daten wird ein Modell für jeden Maschinenbetriebsbereich konstruiert. Der Fuzzy-Logic-Regler wird mit mindestens einem erzeugten Modell in einer Rückführungsschleife von dem Stromregelausgang zu dem Leistungseingang simuliert. Die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter werden anhand der Simulation optimiert.

[0023] Die obigen Aufgaben sowie weitere Aufgaben, Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung gehen aus der folgenden eingehenden Beschreibung der besten Art der Durchführung der Erfindung in Verbindung mit den Begleitzeichnungen hervor.

#### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0024] Fig. 1 ist ein Blockdiagramm eines Starter-/Alternatorsystems nach einer erfindungsgemäßen Ausführung;

[0025] Fig. 2 ist ein Blockdiagramm einer Simulation für die Optimierung der Fuzzy-Entscheidungsparameter nach einer erfindungsgemäßen Ausführung;

[0026] Fig. 3a-3c sind Diagramme, welche die Fuzzy-Entscheidungsparameter nach einer erfindungsgemäßen Ausführung zeigen;

[0027] Fig. 4 ist eine Kurvendarstellung, welche die optimale Effizienzabbildung von vier Konturen mit konstanter Leistung für einen 12-poligen Starter/Alternator mit 8 kW nach einer erfindungsgemäßen Ausführung zeigt;

[0028] Fig. 5a und 5b sind Kurvendarstellungen, welche den Temperatursausgleich eines Fuzzy-Reglers für einen 12-poligen Starter/Alternator mit 8 kW nach einer erfindungsgemäßen Ausführung zeigen, und

[0029] Fig. 6a-6c sind Kurvendarstellungen, welche die Betriebsparameter als Funktion der Läufergeschwindigkeit für einen 12-poligen Starter/Alternator mit 8 kW nach einer erfindungsgemäßen Ausführung zeigen.

- [0030] Unter Bezug nun auf Fig. 1 wird ein Blockdiagramm eines Starter-/Alternatorsystems gezeigt. Ein insgesamt bei 30 gezeigtes Starter-/Alternatorsystem umfasst einen mit der programmierbaren Last 24 gekoppelten Starter/Alternator 22. Die programmierbare Last 24 kann im Modus konstanter Geschwindigkeit oder im Modus konstanter Drehzahl basierend auf einem Lastprofil 26 betrieblen werden, welches von einem Rechner unter Steuerung der Grafik-Benutzeroberfläche (GUI) 28 erzeugt wurde. Die GUI 28 berechnet das Lastdrehmoment 30 und die Geschwindigkeit 32, wovon jede zur Regelung des Starters/Alternators 22 verwendet werden kann. Wird die Last 24 über die Geschwindigkeit geregelt, wird der Starter/Alternator 22 über das Drehmoment geregelt. Der Schalter 34 wird so gesetzt, dass das Lastdrehmoment 30 als Drehmomentbefehl  $\delta^*$ , 36 übergeben wird. Wird die Last 24 über das Drehmoment geregelt, wird der Starter/Alternator 22 über die Geschwindigkeit geregelt. Der Geschwindigkeitsregler 38 nimmt die Lastgeschwindigkeit 32 und die Läufergeschwindigkeit  $T$ , 40, an und erzeugt die Drehmomentschätzung 42. Die Läufergeschwindigkeit 40 wird anhand der Läuferposition, 2 Rotor, 46, durch einen Beobachter 44 erzeugt. Der Schalter 34 wird so gesetzt, dass die Drehmomentschätzung 44 als Drehmomentbefehl 36 übergeben wird. Die Drehmoment-zu-Iq-Umsetzung nimmt den Drehmomentbefehl 36 und den Flußstrom  $ID^*$ , 50 an und erzeugt den Drehmomentstrom  $Iq^*$ , 52. Der Vektorstrom-Regler 54 erzeugt ein Wechselrichter-Regelsignal  $V^*$ , 56 mit Hilfe des Drehmomentstroms 52, des Flußstroms 50 und des Zustands der elektrischen Verbindungen 58 des Starters/Alternators. Der IGBT-Wechselrichter 60 wandelt die Busleistung 62 in elektrische Eingangsleistung an den elektrischen Verbindungen 58 um, wenn der Starter/Alternator 22 als Motor läuft, und wandelt die elektrische Ausgangsleistung an den elektrischen Verbindungen 58 in Busleistung 62 um, wenn der Starter/Alternator 22 als Generator läuft. Dieses System besitzt eine Vierquadrantensteuerung, was einen Motor- oder Generatorbetrieb in jeder Drehrichtung erlaubt. Der Gleichstrombus 62 ist die elektrische Leistungsquelle, wenn der Starter/Alternator 22 sich im Motorbetrieb befindet, und ist die elektrische Leistungssenke, wenn der Starter/Alternator 22 sich im Generatorbetrieb befindet.
- [0031] Der Drehmomentbefehl-Regelkreis 36 des IGBT-Wechselrichters 60 ist so ausgelegt, dass er eine relativ schnelle Zeitkonstante aufweist, was eine schnelle Reaktion auf kleine Änderungen der Lastbedingungen erlaubt.
- [0032] Der Fuzzy-Regler 64 erzeugt den Flußstrom 50, um die Leistungseffizienz des Starters/Alternators 22 oder eines Subsystems mit einem Starter/Alternator 22 zu optimieren. Der den Fuzzy-Regler 64 enthaltende Regelkreis ist so ausgelegt, dass er eine relativ lange Zeitkonstante hat, was langsame Reaktionen auf Änderungen der Betriebsbedingungen, wie zum Beispiel neue Lastbetriebsbereiche oder Temperatur, erlaubt. Der Fuzzy-Regler 64 erzeugt anhand der Leistung im Signal 66 Flußstrom 50. Der Schalter 68 wählt zwischen elektrischer Motorleistung 70, wenn die Effizienz des Starters/Alternators 22 optimiert werden soll, und der elektrischen Busleistung 72, wenn die Effizienz des Starters/Alternators 22 und des Wechselrichters 60 optimiert werden soll. Wenn sich der Starter/Alternator 22 im Motorbetrieb befindet, wird die Effizienz durch Minimieren der Leistung in 66 für eine mechanische Leistung mit vorgegebenem Bemessungsleistung optimiert. Wenn sich der Starter/Alternator 22 im Generatorbetrieb befindet, wird die Effizienz durch Maximieren der Leistung in 66 für eine mechanische Leistung mit vorgegebener Bemessungsleistung optimiert.
- [0033] Das Ziel des Fuzzy-Logic-Reglers 64 ist die Optimierung der Leistungseffizienz in einem bzw. in beiden der Generator- und Motorbetriebsarten. Die Effizienz des Induktionsmaschinensystems 20 ist eine Funktion vieler Variablen, einschließlich der Maschinenkonstruktion, der Leistungskomponenten, wie Umrichter, Wechselrichter, Schalter, Pulsbreitenmodulatoren usw., der Steueralgorithmen und der Betriebsbedingungen, wie Last und Temperatur. Ein bei einem Bemessungsfluß betriebenes Maschinensystem weist normalerweise das beste Übergangsverhalten auf. In Perioden leichter Lasten, die bei normalem Gebrauch häufig auftreten, ergibt sich ein übermäßiger Kernverlust, wenn der Bemessungsflußstrom angelegt wird. Dies verringert stark die Leistungseffizienz des Starter-/Alternatorsystems 20. Durch richtiges Regeln des Flußstroms 50 mit dem Fuzzy-Logic-Regler 64 kann eine optimale Effizienz auch unter Leichtlastbedingungen verwirklicht werden. Die dynamische Reaktion, welche bestimmt, wie die optimale Effizienz erreicht wird, kann durch Abstimmen des Fuzzy-Logic-Reglers 64 gesetzt werden.
- [0034] Das Abstimmen des Fuzzy-Reglers 64 beginnt durch Erhalten von Daten, welche die Leistung 66 mit dem Flußstrom 55 verknüpfen. Dies kann durch Entfernen des Fuzzy-Reglers 64 aus dem Starter-/Alternatorsystem 20 verwirklicht werden. Für jeden gewünschten Betriebsbereich des Systems wird die Leistung 66 für jeden einer Menge von angeordneten Flußströmen 50 gemessen. Das Modell für jeden Betriebsbereich ist eine Tabelle, welche den Flußstrom 50 mit der Leistung 66 verknüpft. Es wird Interpolation verwendet, um die Leistung 66 für Werte des Flußstroms 50 zwischen den Tabelleneinträgen zu erhalten. Dieses Modell hat mehrere Vorteile gegenüber traditionellen mathematischen Modellen. Zum einen berücksichtigt das Modell alle Komponenten des Systems 20 zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Fuzzy-Reglers. Dies beinhaltet den Wechselrichter 60, den Geschwindigkeitsregler 38 und den Stromregler 54 sowie den Starter/Alternator 22. Zu anderen werden Systemkomplexitäten, wie Nichtlinearitäten, Wirkungen höherer Ordnung usw., automatisch in das Modell integriert. Zum Dritten kann jede Änderung von Komponenten oder Betriebsbedingungen schnell mit Hilfe des gleichen Verfahrens modelliert werden, ohne dass das Analysenmodell geändert oder neue Analysemodellparameter geschätzt oder experimentell ermittelt werden müssen.
- [0035] Dann werden ein oder mehrere Modelle als Hardware-Daten-in-der-Simulationsschleife zum Abstimmen der Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter verwendet. Es wird eine Simulation mit dem Fuzzy-Regler 64 konstruiert, die das Modell "regelt". Die Aufgabe der Simulation besteht darin, zu beobachten, wie der Fuzzy-Logic-Regler 64 eine optimale Leistungseffizienz erreicht. Insbesondere wird eine Prüfung durchgeführt, um festzustellen, ob die dynamische Reaktion der Leistung 66 gegenüber der Zeit die Designkriterien erfüllt. Falls nicht, werden die Entscheidungsparameter für den Fuzzy-Regler 64 solange abgeändert, bis die gewünschte dynamische Reaktion erreicht wird. Die Entscheidungsparameter können manuell oder automatisch geändert werden.
- [0036] Als Alternative zur manuellen Änderung der Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter und dem erneuten Ablaufenlassen der Simulation können die Entscheidungsparameter mit Hilfe adaptiver Neuro-Fuzzy-Inferenz, die von einem adaptiven Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem (ANFIS) bereitgestellt wird, automatisch abgestimmt werden. Der Vorgang erfolgt in zwei Schritten. Zum einen wird ein allgemeines Fuzzy-System aus den Übungsdaten und den vom Anwender ge-

lieferten Eingaben, einschließlich der Anzahl der Reglereingaben, der Anzahl der Mitgliedsgradfunktionen, der gewünschten Form der Mitgliedsgradfunktionen, usw., automatisch erzeugt. Dies kann zum Beispiel durch Einsatz des MATLAB® Fuzzy Logic Toolbox Genfis1-Algorithmus, der einen Gitterpartitionssstil verwendet, verwirklicht werden. Als Nächstes kann das allgemeine Fuzzy-System mit Hilfe von ANFIS lernen oder sich an die Übungsdaten anpassen. ANFIS stimmt das Fuzzy-System ab, wobei es zum Beispiel die Mitgliedsgradfunktionen mit Hilfe eines rückwärts fortplanzenden Algorithmus aufgrund der Eingabe-/Ausgabe-Übungsdaten ändert. Es wird eine Fehlerminimierung der kleinsten Quadrate zwischen den tatsächlichen und den gewünschten Ausgaben erreicht. Ein Befolgen dieses Vorgehen und eine Integration der HDSL-Daten ermöglicht eine automatische Abstimmung, die alle Systemnichtlinearitäten und das Reglerverhalten ohne die Notwendigkeit komplexer Systemmodellierung integriert.

[0037] Unter Bezug auf Fig. 2 wird ein Blockdiagramm einer Simulation zur Optimierung von Fuzzy-Entscheidungsparametern gezeigt. Die Optimierungssimulation 98 umfasst den Fuzzy-Regler 64 mit der Fuzzy Logic 100, welche die nächste Änderung des Flußstroms)ID(next), 102 aufgrund der letzten Leistungsänderung)Pd, 104 und der letzten Änderung des Flußstroms)Id(last), 106, erzeugt. Das Summierungsglied 108 und die Verzögerung 110 wandeln die nächste Änderung des Flußstroms 102 in den nächsten Flußstrom 50 um. Der Schalter 114 wählt, welches Modell 116 den Flußstrom 50 erhält. Das gewählte Modell 116 gibt die Leistung 66 aus, welche zur Änderung in Leistung 120 durch den Differenzierer 122 und die Verzögerung 124 umgewandelt wird. Der Sättigungsbegrenzer 126 begrenzt den Bereich der Änderung der Leistung 102, um eine Leistungsänderung 104 zu erzeugen. Das Verzögerungselement 128 erzeugt die letzte Änderung des Flußstroms 106 von der nächsten Änderung des Flußstroms 102. Die Strecke von der nächsten Änderung des Flußstroms 102 durch Modell 116 zu der Leistungsänderung 104 bildet eine Rückführpfad von dem Fuzzy-Regler-Ausgang 50 zu dem Fuzzy-Regler-Eingang 66, allgemein durch 130 dargestellt.

[0038] Unter normalen Betriebsbedingungen sind nur geringfügige Korrekturen seitens des Fuzzy-Reglers 64 erforderlich, sobald die optimale Effizienz im stabilen Zustand erreicht ist. Bei Auftreten einer Änderung der Betriebsparameter des Maschinensystems findet der Fuzzy-Regler 64 jedoch eine neue optimale Effizienz. Eine Änderung der Betriebsparameter kann auftreten, wenn ein neuer Maschinenbetriebsbereich angeordnet wird, wie zum Beispiel eine Änderung der Last, oder wenn es zu einer Änderung der Betriebsbedingungen kommt, zum Beispiel einer Temperaturänderung. Derartige Änderungen können durch Verbinden eines anderen Modells 116 mittels Schalter 114 mit dem Fuzzy-Regler 64 simuliert werden.

[0039] Unter Bezug auf Fig. 3a bis 3c werden nun Diagramme mit Fuzzy-Entscheidungsparametern gezeigt. Fig. 3a zeigt die Mitgliedsgradfunktion für eine Leistungsänderung, die insgesamt bei 200 gezeigt wird. Die Leistungsänderung 104 ist in sieben Fuzzy-Mengen unterteilt: negativ groß (NB) 202, negativ mittel (NM) 204, negativ klein (NS) 206, Null (ZE) 208, positiv klein (PS) 210, positiv mittel (PM) 212 und positiv groß (PB) 214. Die Änderung der Leistungs-Mitgliedsgradfunktion 200 bricht die Leistungsänderung 104 in sieben Bereiche basierend auf der Größe und Richtung bzw. Vorzeichen der letzten Leistungsänderung 104 auf.

[0040] Fig. 3b zeigt die Mitgliedsgradfunktion für die letzte Stromänderung, insgesamt bei 220 dargestellt. Die letzte Änderung der Strom-Mitgliedsgradfunktion 220 bricht die letzte Stromänderung 106 in zwei Fuzzy-Mengen auf: negativ (N) 222 und positiv (P) 224. Die letzte Änderung der Strom-Mitgliedsgradfunktion 220 ermittelt im Grunde genommen das Vorzeichen der letzten Stromänderung 106.

[0041] Fig. 3c zeigt die Mitgliedsgradfunktion für die nächste Stromänderung, die insgesamt bei 240 gezeigt wird. Die nächste Änderung der Strom-Mitgliedsgradfunktion 240 unterteilt die nächste Stromänderung 102 in sieben Fuzzy-Mengen: negativ groß (NB) 242, negativ mittel (NM) 244, negativ klein (NS) 246, Null (ZE) 248, positiv klein (PS) 250, positiv mittel (PM) 252 und positiv groß (PB) 254. Somit kann die Ausgangsgröße des Fuzzy-Reglers 64 in Größe und Vorzeichen variiert werden.

[0042] In dieser Anwendung umfasst das Optimieren der Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter das Abändern des Bereichs und der Form der Fuzzy-Mengen in den Mitgliedsgradfunktionen 200, 220, 240. Insbesondere können der Ausgangspunkt, der Endpunkt und der Spitzenpunkt für jede Menge 202-214, 222-224, 242-254 variiert werden, um eine gewünschte dynamische Reaktion zu verwirklichen. Zwar werden dreieckige Mengen gezeigt, doch für einen Durchschnittsfachmann auf dem Gebiet ist nachvollziehbar, dass eine Fuzzy-Menge jeder Form verwendet werden kann, einschließlich trapezförmig, gaußisch, kosinusquadrant usw..

[0043] Unter Bezug auf Fig. 4-6 werden nun experimentelle Ergebnisse gezeigt, die mit Hilfe eines nach einer erfindungsgemäßen Ausführung optimierten Fuzzy-Logic-Reglers erhalten wurden. Der Fuzzy-Logic-Regler regelte eine 12-polige Maschine mit 8 kW mit parallel-verbundenen Wicklungen in einer Alternator-Konfiguration. Der Starter/Alternator wird in einem Fachaufsatz von J. M. Miller et al. mit dem Titel "Starter-Alternator for Hybrid Electric Vehicle: Comparison of Induction and Variable Reluctance Machines and Drives", erschienen in IEEE IAS Conference Proceedings, Seiten 513-523, 1998, beschrieben. Die nachstehende Tabelle 1 listet die gemessenen Motorparameter einer äquivalenten Schaltung auf.

Tabelle 1

Gemessene Motorparameter

Parameter	Einheiten
Ständerwiderstand ( $R_s$ )	31 m $\Omega$
Ständerinduktivität ( $L_s$ )	0,14 mH
Läuferwiderstand ( $R_r$ )	15 m $\Omega$
Läuferinduktivität ( $L_r$ )	0,09 mH
Hauptinduktivität (bei 46 Zweigen)	0,99 mH

[0044] Unter Bezug auf Fig. 4 wird nun eine Kurvendarstellung gezeigt, welche die optimale Effizienzabbildung von vier Konturen konstanter Leistung nach einer erfindungsgemäßen Ausführung zeigt. Die optimale Effizienz als Funktion der Läuferdrehzahl wird für Konturen konstanter Leistung von 1 kW durch Kurvendarstellung 270, von 2 kW durch Kurvendarstellung 272, von 4 kW durch Kurvendarstellung 274, von 6 kW durch Kurvendarstellung 276 und von 8 kW durch Kurvendarstellung 278 gezeigt. Die optimale Effizienz des Starters/Alternators liegt bei 1.400 U/min bei etwa 85%, fällt aber auf bis zu 35% bei Drehzahlen unter 300 U/min.

[0045] Unter Bezug auf Fig. 5a und 5b werden nun Kurvendarstellungen gezeigt, die den Temperatursausgleich eines Fuzzy-Reglers für eine erfindungsgemäße Ausführung vorführen. Die Fähigkeit des Fuzzy-Reglers, die maximale Effizienz des Starters/Alternators während sich ändernder Bedingungen zu wahren, wird in Fig. 5 veranschaulicht. Die Temperatur-Kurvendarstellung 282 des Ständers wird als Funktion der Zeit ansteigend gezeigt. Die Zeit wird in Form von Fuzzy-Regler-Optimierungsschritten ausgedrückt. Wie durch die Effizienz-Kurvendarstellung 284 veranschaulicht, verfolgt der Fuzzy-Regler weiter, wenngleich die optimalen Effizienzpunkte bei höheren Temperaturen sinken.

[0046] Unter Bezug auf Fig. 6a-6c werden nun Kurvendarstellungen gezeigt, welche die Betriebsparameter als Funktion der Läuferdrehzahl für eine erfindungsgemäße Ausführung zeigen. Vergleiche zwischen der vorherbestimmten und gemessenen Effizienz und Spannung wurden für den von der Fuzzy Logic geregelten Induktionsmotor erhalten. Die Ergebnisse der Optimierung wurden auf einer Kontur mit 4 kW konstanter Leistung erhalten.

[0047] Bei vorgegebenem Drehmoment  $T$ , Drehzahl  $n$  und Erregerfrequenz  $f$  kann die Spannung wie in Gleichung (1) gezeigt ermittelt werden:

$$|V| = \sqrt{T \left( \frac{2\pi f}{3p} \right) \left( \frac{1 - \frac{n p}{60 f}}{R_s} \right) \left( \left( R_s + \frac{\Sigma R_r}{1 - \frac{n p}{60 f}} \right)^2 + 4\pi^2 f^2 (\Sigma L_s + L_r)^2 \right)} \quad (1)$$

wobei  $p$  die Anzahl der Pole ist. Es ist möglich, diese Größen zur Berechnung der verbleibenden Spannungen und Ströme in der äquivalenten Schaltung des Induktionsmotors zu verwenden.

[0048] Der Ausdruck für die Effizienz des Induktionsmotors wird in Gleichung (2) gezeigt:

$$\eta = \frac{T \frac{n\pi}{30}}{\frac{2\pi f}{p} T + P_{\text{Feo}} \left( \frac{E_s}{E_o} \right)^2 + P_{\text{rwo}} \left( \frac{n}{n_o} \right)^3 + 3I_s^2 R_s} \quad (2)$$

wobei  $P_{\text{Feo}}$  der Eisenkernverlust ohne Last ist,  $P_{\text{rwo}}$  die Reibungs- und Wicklungsverluste darstellt und  $E_o$  die Nennspannung bei der Charakterisierungsdrehzahl  $n_o$  U/min ist. Bei vorgegebenem Drehmoment und Drehzahl kann die Effizienz bezüglich der Erregerfrequenz  $f$  maximiert werden.

[0049] In den Fig. 6a-6c werden die gemessenen Parameter als Funktion von U/min. durch offene Kreise gezeigt, die durch eine Linie verbunden sind. Die geschätzten Parameter ohne Kernsättigung werden durch offene Quadrate angezeigt und die geschätzten Parameter mit Kernsättigung werden durch Kreuze angezeigt. In Fig. 6a wird gezeigt, dass die Kurve 290 der gemessenen Effizienz gut der geschätzten gesättigten Effizienz folgt. In Fig. 6b folgt die Kurve 292 der gemessenen Erregerfrequenz der geschätzten Erregerfrequenz. In Fig. 6c folgt die Kurve 294 der gemessenen verketteten Spannung eng den erwarteten gesättigten Spannungswerten.

[0050] Zwar wurden erfindungsgemäße Ausführungen veranschaulicht und beschrieben, doch diese Ausführungen sollen nicht alle möglichen Ausgestaltungen der Erfindung veranschaulichen und beschreiben. Vielmehr sind die Ausführungen der Patentbeschreibung beschreibender und nicht einschränkender Natur und es können verschiedene Abwandlungen vorgenommen werden, ohne vom Wesen und Schutzzumfang der Erfindung abzuweichen.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers eines umlaufenden Induktionsmaschinensystems, wobei der Fuzzy-Logic-Regler mindestens einen Eingang und mindestens einen Ausgang aufweist, jeder Eingang einen Maschinensystem-Betriebsparameter annimmt, jeder Ausgang mindestens einen Maschinensystem-Regelparameter erzeugt, der Fuzzy-Logic-Regler so arbeitet, dass er jede Ausgangsgröße anhand von mindestens einer Eingangsgröße und von Fuzzy-Logic-Entscheidungsparametern erzeugt, wobei das Verfahren Folgendes umfasst:  
Erhalten einer Datenmenge, welche den mindestens einen Regelparameter mit dem mindestens einen Betriebsparameter für mindestens einen Maschinenbetriebsbereich verknüpft;  
Konstruieren eines Modells für jeden des mindestens einen Maschinenbetriebsbereichs anhand der erhaltenen Daten für den Maschinenbetriebsbereich;  
Simulieren des Fuzzy-Logic-Reglers mit mindestens einem erzeugten Modell in einer Rückführungsschleife von mindestens einem Fuzzy-Logic-Ausgang zu mindestens einem Fuzzy-Logic-Eingang und  
Optimieren der Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter anhand der Simulation.
2. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers einer umlaufenden Induktionsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Betriebsparameter einen Messwert der Ausgangsleistung des Maschinensystems umfasst.
3. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers einer umlaufenden Induktionsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Regelparameter einen Flußstrom umfasst.
4. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers einer umlaufenden Induktionsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das mindestens eine Modell eine Vielzahl von Modellen ist, wobei das Simulieren des Fuzzy-Logic-Reglers das Schalten zwischen den Modellen zur Erzeugung einer Störeingabe zu dem Fuzzy-Logic-Regler umfasst.
5. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers einer umlaufenden Induktionsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter Fuzzy-Mitgliedsgradfunktionen umfassen.
6. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers einer umlaufenden Induktionsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter optimiert werden, um eine gewünschte dynamische Reaktion für das Maschinensystem zu erhalten.
7. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers einer umlaufenden Induktionsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter optimiert werden, um die Leistungseffizienz des Maschinensystems zu optimieren.
8. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers einer umlaufenden Induktionsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter mit Hilfe von adaptiver Neuro-Fuzzy-Inferenz optimiert werden.
9. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers einer umlaufenden Induktionsmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Konstruieren jedes Modells das Aufbauen einer Tabelle für jeden Maschinenbetriebsbereich, welche mindestens einen Maschinensystem-Betriebsparameter mit mindestens einem Maschinensystem-Regelparameter verknüpft, umfasst.
10. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein Starter-/Alternatorsystem, wobei der Fuzzy-Logic-Regler einen Eingang für die Systemleistung und einen Ausgang für die Flußstromregelung umfasst, der Fuzzy-Logic-Regler so arbeitet, dass er eine Stromregelungsausgangsgröße anhand der Leistungseingangsgröße und der Fuzzy-Logic-Entscheidungsparametern erzeugt, wobei das Verfahren Folgendes umfasst:  
Erhalten einer Datenmenge, welche die Systemleistung mit der Stromregelung für mindestens einen Maschinenbetriebsbereich verknüpft;  
Konstruieren eines Modells für jeden Maschinenbetriebsbereich anhand der erhaltenen Daten;  
Simulieren des Fuzzy-Logic-Reglers mit mindestens einem erzeugten Modell in einer Rückführungsschleife von dem Stromregelausgang zu dem Leistungseingang und  
Optimieren der Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter anhand der Simulation.
11. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein Starter-/Alternatorsystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das mindestens eine Modell eine Vielzahl von Modellen ist, wobei das Simulieren des Fuzzy-Logic-Reglers das Schalten zwischen den Modellen zur Erzeugung einer Störeingabe zu dem Fuzzy-Logic-Regler umfasst.
12. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein Starter-/Alternatorsystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter Fuzzy-Mitgliedsgradfunktionen umfassen.
13. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein Starter-/Alternatorsystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter optimiert werden, um eine gewünschte dynamische Reaktion für das Starter-/Alternatorsystem zu erhalten.
14. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein Starter-/Alternatorsystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter optimiert werden, um die Leistungseffizienz des Starter-/Alternatorsystems zu optimieren.
15. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein Starter-/Alternatorsystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Fuzzy-Logic-Entscheidungsparameter mit Hilfe von adaptiver Neuro-Fuzzy-Infe-

# DE 101 46 376 A 1

renz optimiert werden.

16. Verfahren zur Optimierung eines Fuzzy-Logic-Reglers für ein Starter-/Alternatorsystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Konstruieren jedes Modells das Aufbauen einer Tabelle für jeden Betriebsbereich, welche den Flußstrom mit der Systemleistung verknüpft, umfasst.

5

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

45

50

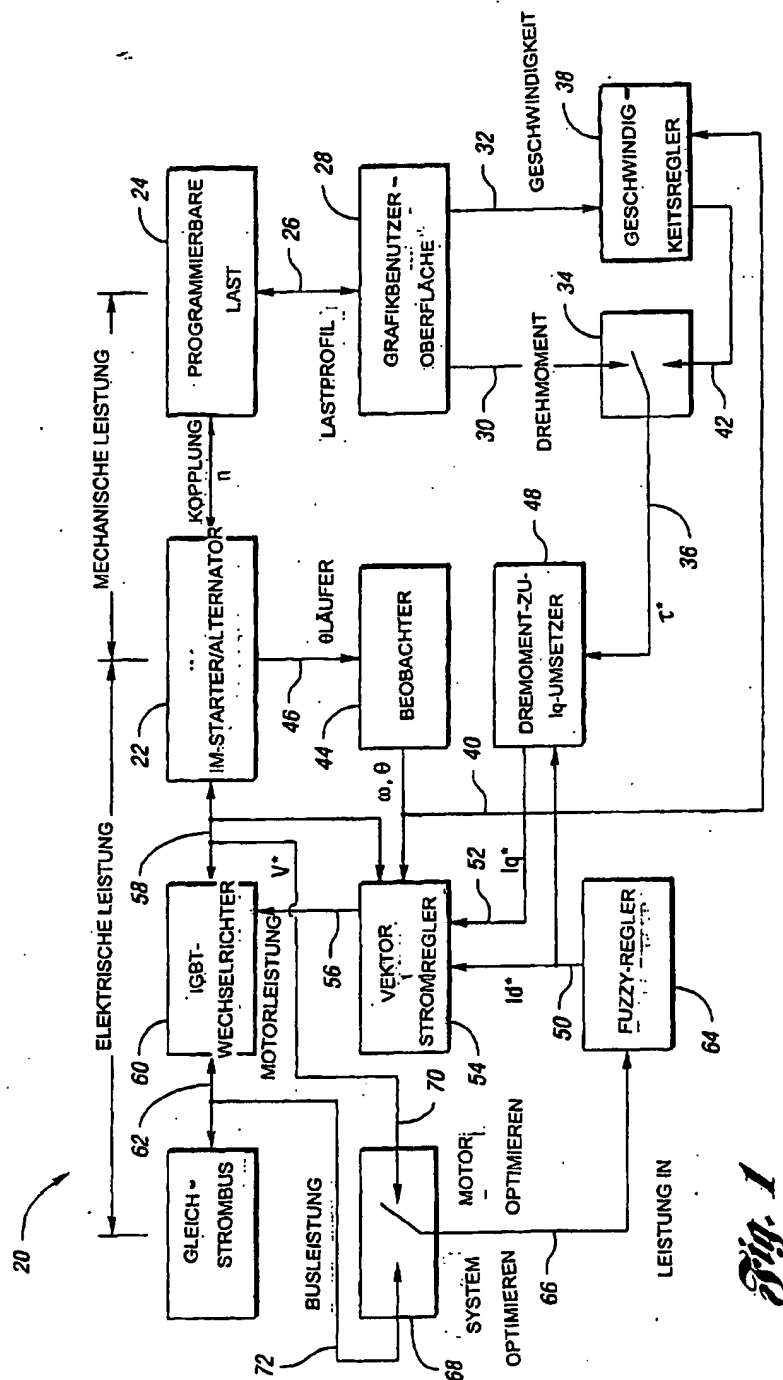
55

60

65



- Leerseite -



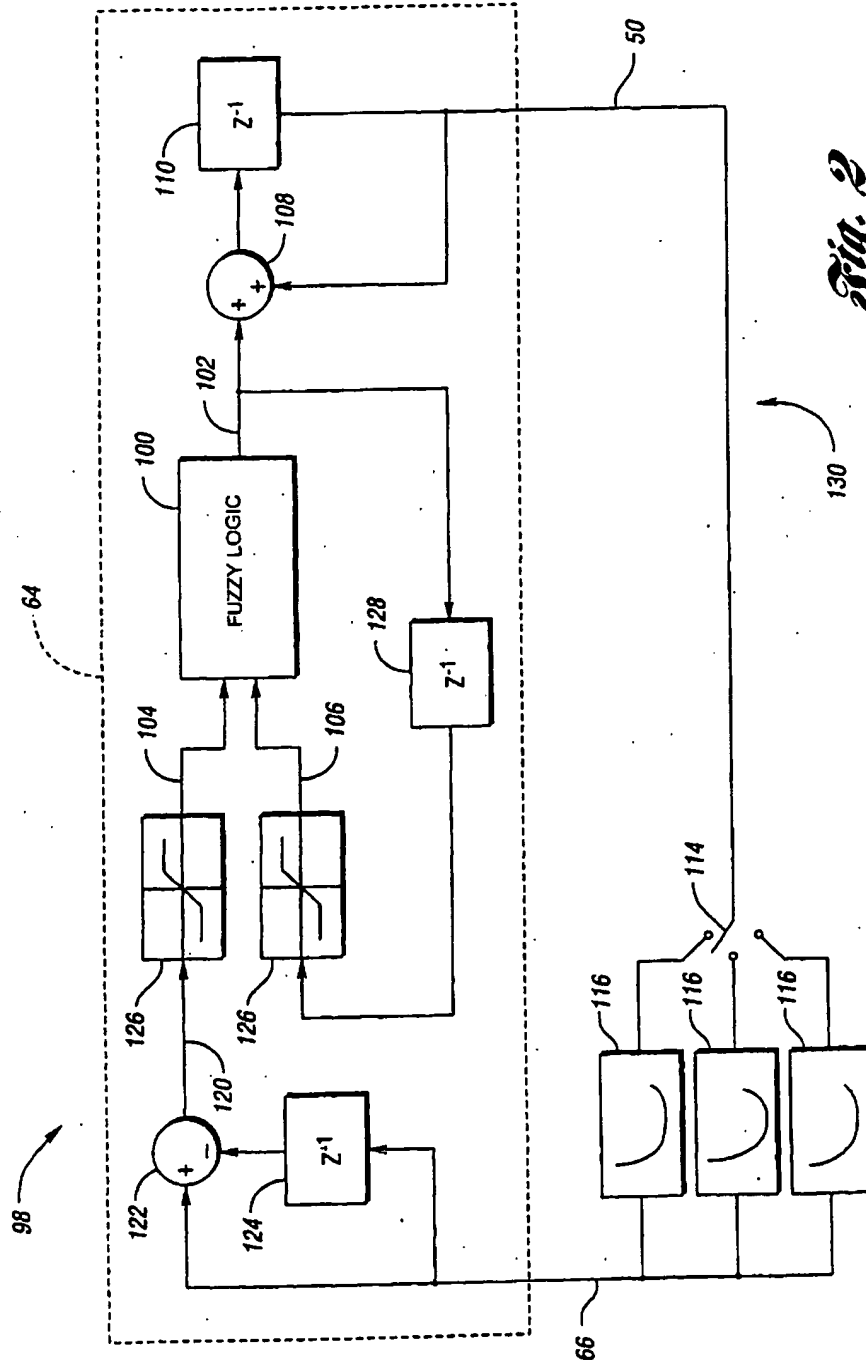


Fig. 2

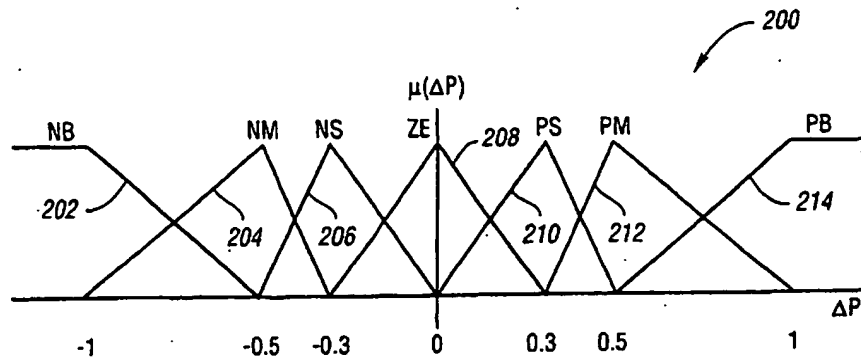


Fig. 3a

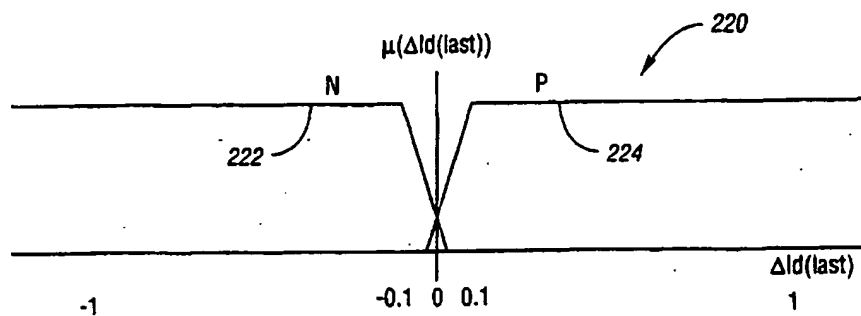


Fig. 3b

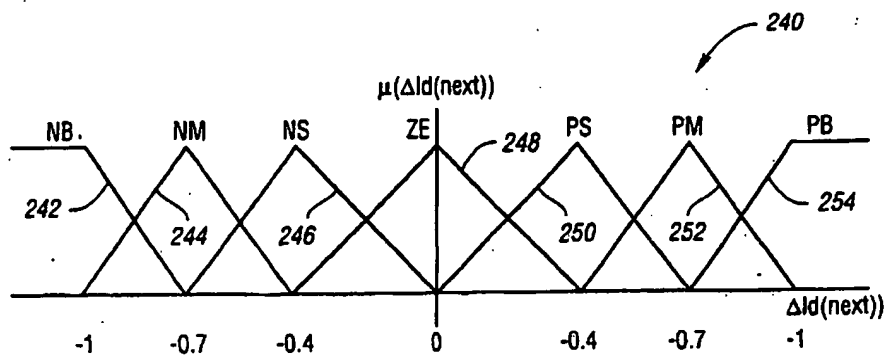
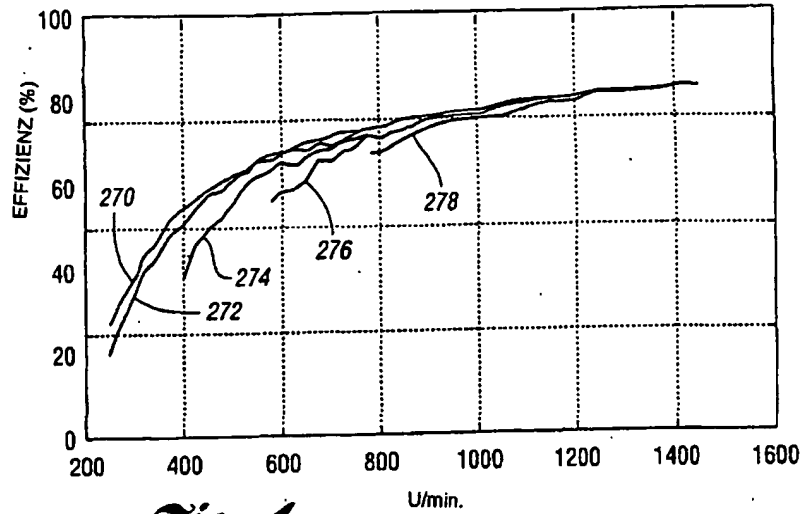
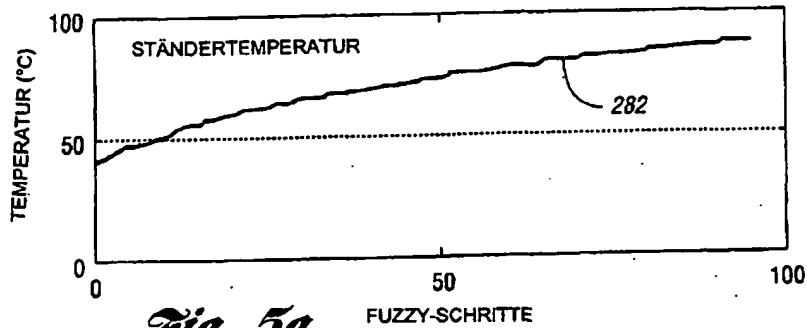


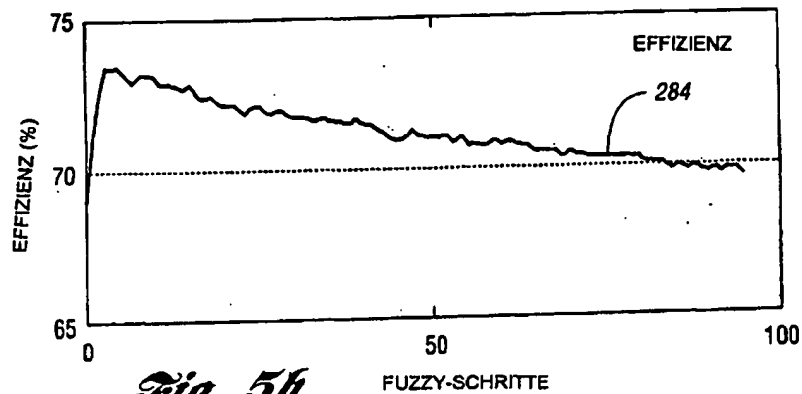
Fig. 3c



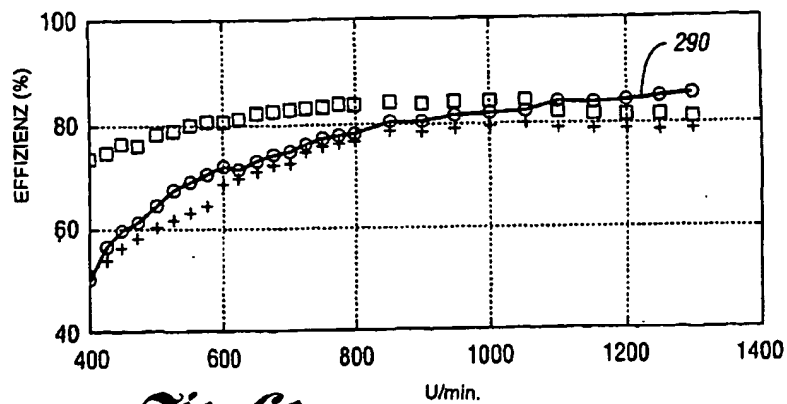
*Fig. 4*



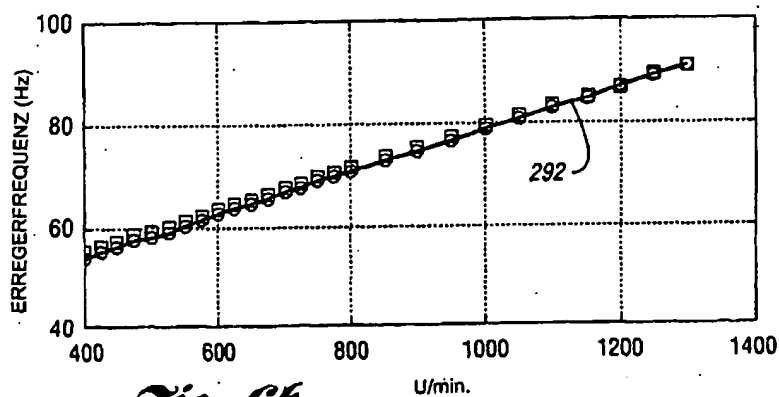
*Fig. 5a*



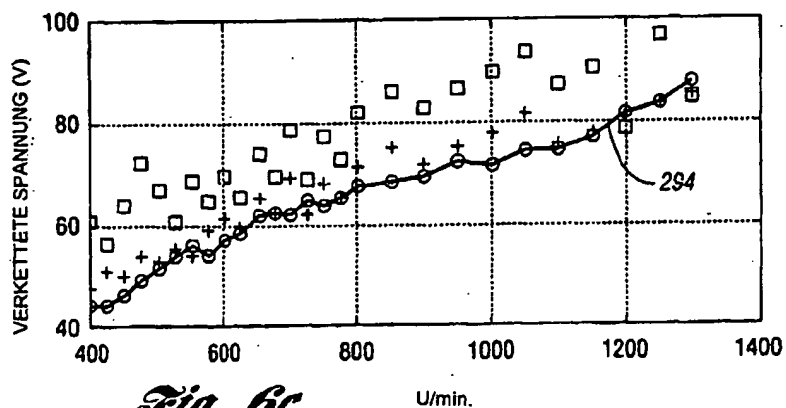
*Fig. 5b*



*Fig. 6a*



*Fig. 6b*



*Fig. 6c*